

О.Ф. ЄНІКЄЄВ, Ф.М. ЄВСЮКОВА, О.В. СУБОТІН, О.Ю. ПРИХОДЬКО

АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Запропоновано методику синтезу апаратних засобів керування параметрами технологічних процесів. Отримано модель виконуючого механізму верстату та на основі принципу керування за відхиленням побудовано структурну схему системи. Проведено математичне моделювання компонент системи керування та в результаті аналізу структурної схеми отримано передатну функцію. Розроблено інформаційну технологію аналізу частотних характеристик системи керування з використанням середовища Matlab. Комп'ютерним моделюванням отримано амплітудні частотні характеристики, годограф Найквіста, перехідну та імпульсну перехідну характеристики, а також визначено запас стійкості системи за амплітудою. Доведено, що використання розроблених методик підвищує продуктивність процесу синтезу апаратних засобів

Ключові слова: апаратні засоби, продуктивність, математичне та комп'ютерне моделювання.

А.Ф. ЕНИКЕЕВ, Ф.М. ЕВСЮКОВА, О.В. СУБОТИН, О.Ю. ПРИХОДЬКО

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предложена методика синтеза аппаратных средств управления параметрами технологических процессов. Получена модель исполнительного механизма станка и на основе принципа управления по отклонению построена структурная схема системы. Проведено математическое моделирование компонент системы управления и в результате анализа структурной схемы получена передаточная функция. Разработана информационная технология анализа частотных характеристик системы управления с использованием среды Matlab. Компьютерным моделированием получены амплитудно-частотные характеристики, годограф Найквиста, переходная и импульсная переходная характеристики, а так же установлен запас устойчивости системы по амплитуде. Доказано, что применение разработанных методик повышает производительность процесса синтеза аппаратных средств.

Ключевые слова: аппаратные средства, производительность, математическое и компьютерное моделирование.

A.YENIKIEIEV, F.YEVSUKOVA, O.SUBOTIN, O.PRIHODKO

ANALYSIS ANALYSIS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL OF PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

A technique for the synthesis of hardware for controlling the parameters of technological processes is proposed. The model of the machine's executive mechanism is obtained and a structural diagram of the system is constructed on the basis of the deviation control principle. Mathematical modeling of control system components was carried out and as a result of analysis of the structural scheme a transfer function was obtained. An information technology for analyzing the frequency characteristics of a control system using the Matlab environment has been developed. Computer-aided simulation produced amplitude-frequency characteristics, the Nyquist travel graph, transient and impulse response characteristics, as well as a margin of stability of the system. It is proved that the application of the developed techniques increases the productivity of the hardware synthesis process.

Keywords: hardware, performance, mathematical and computer modeling.

Вступ. Системи автоматичного керування (САК) параметрами технологічних процесів скорочують час обробки поверхні деталі та забезпечують задану шорсткість [1]. Методика побудови апаратних засобів САК із відповідними метрологічними характеристиками та продуктивністю передбачає використання сучасних програмних середовищ та пакетів програм, які суттєво спрощують процедуру виконання відповідних розрахунків. Середовище Matlab [2] розв'язує задачі моделювання САК та її окремих компонент, досліджує точність та швидкодію обробки вхідної інформації в умовах дії випадкових завад.

Постановка проблеми. Логарифмічну амплітудну частотну характеристику використовує інформаційна технологія синтезу апаратних засобів. Побудова математичних моделей компонент враховує фактор невизначеності, який обумовлено дією завад та похибками вимірювань вхідних сигналів. Можливості, які надає середовище Matlab, дозволяють виконати еквівалентні перетворення структурної схеми САК, встановити її особливі точки, побудувати та дослідити відповідні характеристики, скласти та дослідити схему комп'ютерного моделювання процесу перетворення

інформації.

Моделювання компонент САК. Методика синтезу апаратних засобів САК параметрами технологічних процесів складається з таких процедур:

- розробляємо математичні моделі компонент із використанням перетворення Лапласа;
- на основі інформаційного підходу визначаємо смугу нечутливості первинного перетворювача вхідного сигналу навколо номінальної характеристики перетворення;
- визначаємо передатну функцію САК в результаті перетворень її структурної схеми;
- досліджуємо частотні характеристики САК. Спрощення моделі забезпечується за рахунок погашення коренів чисельника та знаменника передатної функції, а також у відкиданні коренів другого порядку малості;
- моделюємо завади компонент та за допомогою методики підсумовування випадкових складових встановлюємо смугу невизначеності вихідного сигналу САК;
- синтез пристрою обробки вхідного сигналу виконуємо на основі мінімізації квадратичного

критерію якості із застосуванням еталонної моделі САК;

- встановлюємо математичну модель вхідного сигналу САК та визначаємо його частотне подання;
- за допомогою теореми про згортку визначаємо вихідний сигнал, який використовуємо в якості прогнозованого при аналізі ефективності апаратних засобів обробки інформації;
- будуємо схему комп'ютерного моделювання процесів перетворення інформації апаратними засобами САК. У результаті аналізу вихідного сигналу робимо висновок про продуктивність та точність її апаратних засобів.

При побудові апаратних засобів у якості виконуючих механізмів (ВМ), які змінюють технологічні параметри процесів механічної обробки поверхонь деталей, знайшли застосування двигуни постійного або змінного струму. Миттєва швидкість обертання є вихідним сигналом, який можливо використати при побудові апаратних засобів зворотного зв'язку. Поведінка двигуна постійного струму у перехідних режимах роботи описується такою системою інтегро-диференціальних рівнянь [3]

$$\left. \begin{aligned} U &= c_1 \Omega + RI + L \frac{dI}{dt} \\ J \frac{d\Omega}{dt} &= M_1 - M_2 \\ \varphi &= \int \Omega dt \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де c_1 – коефіцієнт протито-ЕРС; U – напруга керування; L , R , I – відповідно індуктивність, опір обмотки та струм якорю; Ω , φ – відповідно миттєва швидкість та кут оберту двигуна; M_1 , M_2 – відповідно обертальний та момент навантаження; J – момент інерції.

В операторній формі при нульових початкових умовах рівняння (1) руху двигуна постійного струму набувають такого вигляду

$$\left. \begin{aligned} U &= c_1 \Omega + I(R + pL) \\ Jp\Omega &= c_2 I - M_2 \\ p\varphi &= \Omega \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де c_2 – коефіцієнт моменту.

У системі рівнянь (2) враховано те, що

$$M_1 = c_2 I.$$

Розв'язання системи рівнянь (2) дає таке

$$\frac{U}{c_1} = \frac{JRL}{c_1 c_2 R} p^2 \Omega + \frac{JR}{c_1 c_2} p \Omega + \Omega - \frac{R}{c_1 c_2} \left(1 + \frac{L}{R} p \right) M_2,$$

або

$$kU = (T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1) \Omega - \frac{M_2}{F} (T_1 p + 1), \quad (3)$$

де для двигуна типу СЛ281 маємо наступне:

$$k = k_1 k_2 = 0.87 * 25.39 = 22.1$$

– коефіцієнт

перетворення; $F = c_1 c_2 / R = 0.0018$ – коефіцієнт

демпфування;

$$T_1 = L/R = 0.00043 \text{ с},$$

$T_2 = JR/(c_1 c_2) = 0.011 \text{ с}$ – відповідно електромагнітна та механічна постійні часу.

Передатну функцію двигуна постійного струму за керуючим впливом отримаємо з виразу (3), враховуючи при цьому $M_2 = 0$

$$W_1(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (4)$$

Або у вигляді послідовного з'єднання електромагнітного та механічного ланцюгів

$$W_1(p) = \frac{k_1 k_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (5)$$

Передатну функцію двигуна постійного струму за збурювальним впливом отримаємо з виразу (3), враховуючи при цьому $U = 0$

$$W_2(p) = \frac{T_1 p + 1}{F(T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1)}. \quad (6)$$

Або у вигляді послідовного з'єднання елементарних ланцюгів

$$W_2(p) = \frac{1}{F(T_2 p + 1)}. \quad (7)$$

Вирази (5) та (7) використано при розробці структурної схеми САК повздовжньою подачею токарного верстату (рис. 1). В основу її побудови покладено принцип керування за відхиленням. Цю схему складено з таких елементів: вузол порівняння; давач закону зміну величини повздовжньої подачі (З); обчислювальний блок (ОБ); ξ – збурювальний вплив, який діє на вихідний сигнал САК; МДМ – підсилювач; давач струму (ДС). Виконаємо розробку математичних моделей компонент та аналіз структурної схеми САК з метою отримання виразу для передатної функції.

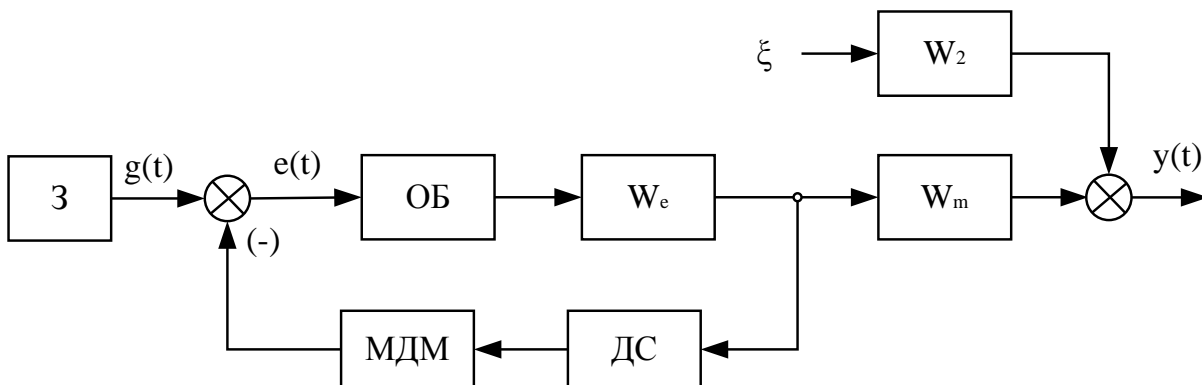


Рис. 1 – Структурна схема САК повздовжньою подачею токарного верстату

ОБ виконує порівняння миттєвої швидкості обертання з оптимальним значенням, яке задає блок З, а також формує керуючий вплив для ВМ. Обчислювальні процедури займають деякий проміжок часу, тривалість якого розраховується на підставі кількості команд керуючої програми та тактової частоти системного генератора. Тому ОБ при виконанні вказаних обчислювальних процедур подаємо у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням. Вихідний сигнал ОБ є керуючим впливом, який корегує роботу двигуна постійного струму. Тому навантаження на відповідну лінію з'єднання подаємо у вигляді електромагнітного ланцюга. На підставі проведеного аналізу та із урахуванням виразу (5) подання передатної функції ОБ має наступний вигляд

$$W_3(p) = \frac{k_1 k_3 e^{-p\tau_3}}{T_1 p + 1}, \quad (8)$$

де $\tau_3 = 0.0001 \text{ C}$ – запізнення ОБ, k_3 – коефіцієнт перетворення.

З урахуванням того, що $e^{p\tau_3} \approx 1 + p\tau_3$, передатна функція ОБ після математичних перетворень набуває такого вигляду

$$W_3(p) = \frac{k_1 k_3}{(p\tau_3 + 1)(pT_1 + 1)}. \quad (9)$$

Коефіцієнт перетворення ОБ визначаємо на підставі такої умови нормування

$$k_1^2 k_2 k_3 = 1. \quad (10)$$

Інформація про оптимальні значення повздовжньої подачі інструменту розташована у базі даних мікроконтролеру. Тому блок З подаємо у вигляді пропорційного ланцюга із такою передатною функцією

$$W_4(p) = 1. \quad (11)$$

Специфіка роботи блоків ДС та МДМ у складі САК токарним верстатом дозволяє подати їх у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням. Передатна функція такого ланцюга має наступний вигляд [3]

$$W_5(p) = k_5 e^{-p\tau_5}, \quad (12)$$

де $k_5 = 27.669$, $\tau_5 = 0.0002 \text{ C}$.

З урахуванням смуги (Δ_1) нечутливості навколо номінальної характеристики перетворення маємо таку передатну функцію блоків ДС та МДМ

$$W_5(p) = \Delta_1 k_5 e^{-p\tau_5}. \quad (13)$$

Похибка обробки вхідного сигналу блоками ДС та МДМ знаходить свій кількісний прояв у змінах вихідного коду. Її кількісну оцінку отримано у роботі [4] на основі статистичної обробки дослідних даних

$$\Delta_1 = \sigma \frac{\mu_1}{\sigma} = 0.036142.$$

Передатна функція блоків ДС та МДМ після математичних перетворень набуває такого вигляду

$$W_5(p) = \frac{\Delta_1 k_5}{1 + p\tau_5}. \quad (14)$$

В результаті аналізу структурної схеми та математичних перетворень отримано передатну функцію САК токарним верстатом у такому вигляді

$$W(p) = \frac{W_1(p)W_3(p)}{1 + W_e(p)W_3(p)W_5(p)}. \quad (15)$$

Після встановлення передатної функції САК токарним верстатом перейдемо до розробки інформаційної технології аналізу її частотних характеристик.

Інформаційна технологія. Розрахунок частотних характеристик САК виконуємо у по командному режимі. Відповідні передатні функції компонент САК токарним верстатом є вихідними даними для середовища Matlab. Їх подаємо у такому вигляді

$$\begin{aligned} W1 &= \text{tf}([k]), [T1 * T2 \ T2 \ 1]) \\ W_e &= \text{tf}([k1], [T1 \ 1]) \\ W3 &= \text{tf}([k1 * k2], [\tau_3 * T1 \ \tau_3 + T1 \ 1]) \\ W5 &= \text{tf}([\Delta_1 * k5], [\tau_5 \ 1]). \end{aligned}$$

Можливості середовища Matlab дозволяють визначити передатну функцію САК токарним верстатом. Для її розрахунку скористаємось наступним виразом

$$W = W1 * W3 / (1 + W_e * W3 * W5).$$

У результаті пошуку нулів та полюсів передатної функції (команди zero та pole) отримали данні, які наведено у таблиці 1. Аналіз її даних дозволяє зробити наступні висновки:

- умові стійкості САК задовольняють усі корні характеристичного рівняння;
- корінь вісім впливає на початок перехідного процесу оскільки малий за величиною;
- корні чисельника та знаменника передатної функції, які приблизно зіпали за величиною, скорочуються
- САК без втрат точності подається такою передатною функцією

$$W(p) = \frac{1}{(T_6 p + 1)(T_4^2 p^2 + 2\xi T_4 p + 1)}, \quad (16)$$

де постійні часу T_4 та T_6 визначаються за допомогою другого, четвертого та п'ятого коренів характеристичного рівняння.

Таблиця 1 – Нулі та полюси передатної функції

zero	pole
ans = 1.0e+04 *	ans = 1.0e+04 *
-1.0000	-1.0000
-0.5000	-0.9963
-0.2326	-0.5260
-0.2326	-0.2214 + 0.0679i
	-0.2214 - 0.0679i
	-0.2326
	-0.2231
	-0.0095

Інформаційна технологія розрахунку у середовищі Matlab частотних характеристик САК складається із наступних обчислювальних процедур:

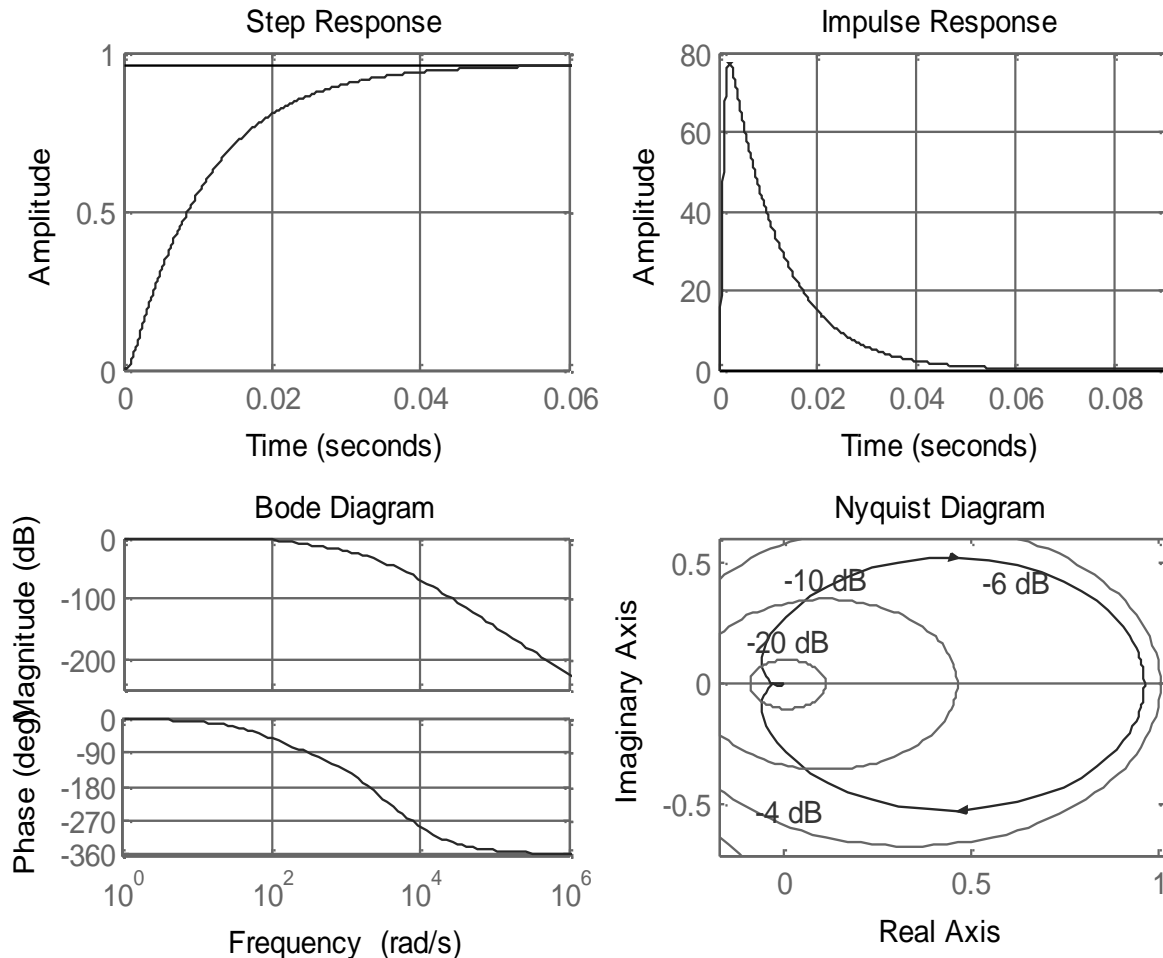


Рис. 2 – Частотні характеристики САК

- за допомогою команди `bode(W)` будуються логарифмічні амплітудні та фазочастотні характеристики;
- за допомогою команди `nyquist(W)` визначаємо годограф Найквіста;
- за допомогою команди `margin(W)` розраховуємо запас стійкості САК за амплітудою;
- перехідна характеристика САК будується за допомогою команди `step(W)`;
- імпульсна перехідна характеристика САК будується за допомогою команди `impulse(W)`;
- аналогічні результати розрахунку отримуємо використовуючи команду `ltiview(w)`, із відповідними налаштуваннями в меню «Plot Configuration» (рис. 2).

Для подальшого синтезу пристроїв обробки сигналів використовуються логарифмічна амплітудна частотна характеристика:

- виконується її лінеаризація;
 - будується бажана характеристика;
 - різниці між ними дає логарифмічну характеристику регулятора;
 - визначається передатна функція регулятора;
- розраховується передатна функція САК із регулятором.

Висновок. На основі математичної моделі двигуна постійного струму розроблено систему автоматичного керування повздовжньою подачею токарного верстату. Побудовано математичні моделі її компонент та у результаті статистичної обробки дослідних даних з використанням інформаційного підходу встановлено швидкісну похибку вимірювань струму виконуючого механізму. Розроблено методику та інформаційну технологію аналізу частотних характеристик систем автоматичного керування у середовищі Matlab. Встановлено, що використання розроблених методики та інформаційної технології підвищує продуктивність процесу синтезу апаратних засобів керування параметрами технологічних процесів.

Список литературы

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. Краматорск: ДГМА, 2001. 160 с.
2. Лазарев Ю.П. Моделирование процессов и систем в Matlab: Учебный курс. С.Пб.: Питер; К.: Изд. группа ВHV, 2005. 512 с.
3. Еникеев А.Ф., Евсюкова Ф.М., Шищенко Л.А. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга. Вестник национального технического университета «ХПИ». 2015. № 4. С. 132 – 137.
4. Єнікєєв О.Ф., Зиков І.С. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга. Вестник Национального

технічного університету «ХПІ». Харків: №57, 2008. С. 87–93.

References (transliterated)

1. Yenikieiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskimi processom almaznogo shlifovaniya*. [Optimal management by the technological process of the diamond polishing.]. Kramatorsk: DGMA, 2001. – 160 p.
2. Lazarev Yu.P. *Modeling of processes and systems in Matlab: Training course*. [Modeling of processes and systems in Matlab] - S.Pb.: Peter; K.: Publ. group BHV, 2005. - 512 p.
3. Yenikieiev A.F., Yevsiukova F.M., Shushenko L.A. *The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel* [The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 4, pp. 132-137.
4. Yenikieiev O.F., Zikov I.S. *Syntezy tsyfrovoho rehuliatora poperechnoi peredachi shlifovalnogo kruga* [Synthesis of digital regulator of transversal transmission of the grinding circle] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, no. 57, pp. 87-93.

Поступила (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єнікєєв Олександр Фанилович (Еникеев Александр Фанилович, O. Yenikieiev) – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Євсюкова Фатима Магометбіївна (Евсюкова Фатима Магомедбиевна, F. Yevsiukova) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru

Суботін Олег Володимирович (Субботин Олег Владирирович, O. Subotin) – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, тел.: (066)-789-77-80, (093)-399-07-93, e-mail: o.v.subotin@ukr.net

Приходько Ольга Юрїївна (Приходько Ольга Юрьевна, O. Prihodko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6452-0465>, e-mail: olmurakami@mail.ru;